

УДК 551.510 + 551.521.3

Межгодовая и сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска (1995–2018 гг.)

Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин, Ю.С. Турчинович*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 19.03.2019 г.

Представлены результаты анализа сезонной и межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы по данным многолетних (1995–2018 гг.) наблюдений в районе г. Томска с использованием солнечных фотометров CE-318 (AERONET) и SP (ИОА СО РАН). Годовой ход АОТ характеризуется минимумом в ноябре и максимумами в начале мая и в июле. В период 2009–2018 гг. годовой ход трансформируется, и преобладающим становится июльский максимум. В межгодовой изменчивости отмечен значимый отрицательный тренд грубодисперсной компоненты общей АОТ. Среднегодовое значение АОТ (0,5 мкм) в период 2002–2018 гг. составило 0,155 (без учета дымов – 0,126), а показатель Ангстрема – 1,32.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, годовой ход, тренды, Сибирь; aerosol optical depth, annual behavior, trends, Siberia.

Введение

В связи с изменениями климата возросла актуальность исследований характера и причин изменчивости компонент климатической системы [1] – газового и аэрозольного составов атмосферы, облачности, снежного и растительного покровов и т.д. Приоритетная задача – выяснение тенденций их многолетней изменчивости, а также особенностей пространственного распределения и сезонных колебаний. Необходимой основой для решения этой задачи являются данные многолетнего мониторинга параметров окружающей среды, влияющих на формирование климата [2].

Дольше всего наблюдения ведутся за содержанием в атмосфере водяного пара и озона [3–6]. В последнее время активно развивается мониторинг концентраций парниковых газов и малых газовых примесей [7–11].

В отличие от газов аэрозоль характеризуется множеством параметров, имеет сложный, непрерывно меняющийся физико-химический состав и, следовательно, оптические характеристики. Из-за многообразия характеристик и используемых методов длинные ряды данных существуют только для отдельных параметров, в частности концентраций аэрозоля и сажи [10–15].

Максимальным географическим охватом и продолжительностью отличаются ряды наблюдений аэрозольной оптической толщи (АОТ) на международных и национальных сетях станций с использованием солнечных фотометров [16, 17]. На территории России регулярные измерения спектральных АОТ проводились в 70–80-х гг. XX в. [18] и возобновились около 20 лет назад.

Аэрозольная оптическая толщина – важная характеристика радиационного переноса, представляющая собой оптический эквивалент общего содержания аэрозоля в атмосфере. Сезонная и межгодовая изменчивости АОТ на территории России оценивалась в основном для длины волны 0,55 мкм по данным интегральных (актинометрических) измерений прямой солнечной радиации [19–22]. Среди большого количества работ, посвященных анализу спектральных АОТ, лишь немногие касаются сезонной и многолетней изменчивости [23–25]. Отчасти это связано с недостаточной продолжительностью рядов наблюдений. Заметим, что в условиях стабильного климата считалось достаточным около 10 лет наблюдений, но в условиях меняющегося климата требуется гораздо большая продолжительность измерений.

В наших предшествующих публикациях [25–28] обсуждалась изменчивость АОТ в районе Томска с колебаниями различных масштабов. В [29] уточняются межгодовая и сезонная изменчивости с учетом новых данных, полученных в последние четыре года. В настоящей работе этот вопрос рассмотрен более подробно; выполнен сравнительный анализ с данными спутниковых наблюдений над югом Томской обл.

* Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru).

1. Характеристика данных

Измерения АОТ атмосферы в летний период в районе Томска начались в 1992 г. С 2000 г. они ведутся круглогодично с использованием солнечных фотометров типа SP [25] (0,34–2,14 мкм) и Sun-Sky радиометров CE-318 (0,34–1 мкм) сети AERONET [17] как вместе, так и по отдельности в восточном пригороде Томска (Академгородок) и в обсерватории «Фоновая», расположенной на 60 км западнее Томска. Результаты двухточечных измерений [25, 30] показали отсутствие статистически значимых различий АОТ в указанных районах.

Для обеспечения максимальной продолжительности рядов наблюдений сформирован общий массив измерений АОТ разными фотометрами в поствулканический (извержение вулкана Пинатубо в 1991 г.) период 1995–2018 гг. За основу взяты данные AERONET версии 2 и 3, уровень 2.0 (для 2018 г. уровень 1.5). Когда наблюдения AERONET не проводились (1995–2002 гг.), использовались результаты измерений фотометром SP.

Обычно в литературе анализируется изменчивость спектральных АОТ и параметров Ангстрема α , β : $\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$. В нашей работе основное внимание уделяется мелко- и грубодисперсным составляющим АОТ τ^f_λ и τ^c [28]; первая характеризуется степенным спадом с ростом длины волны, вторая — постоянная. АОТ в этом случае определяется выражением

$$\tau^a(\lambda) = \tau^f_\lambda + \tau^c \approx m\lambda^{-n} + \tau^c, \quad (1)$$

где m и n — параметры аппроксимации спектрального хода τ^f_λ , аналогичные параметрам α , β . Обычно в качестве τ^f_λ рассматривают ее значение на длине волны 0,5 мкм — $\tau^f_{0,5}$.

Интерес к τ^f_λ и τ^c обусловлен тем, что мелко- и грубодисперсные фракции аэрозоля имеют разное происхождение и по-разному трансформируются в атмосфере. Поэтому для получения более полной информации об изменении АОТ необходимо рассматривать индивидуальную изменчивость ее компонент.

Разделение вклада двух составляющих АОТ для разных фотометров осуществляется с помощью различных методов. Для фотометров SP используется эмпирический подход: τ^c определяется по минимальным значениям АОТ в ИК-диапазоне длин волн ($\lambda > 1,2$ мкм), а компонента $\tau^f_{0,5}$ находится как остаточная от общей АОТ [25–28]. В системе AERONET используется расчетная методика оценки $\tau^f_{0,5}$ — spectral deconvolution algorithm [31]. Сравнительный анализ этих методик определения τ^c и $\tau^f_{0,5}$ [32] и самих результатов измерений АОТ фотометрами SP и CE-318 [25] подтвердил возможность совместного использования их данных.

Общий массив АОТ составил 17645 ее среднечасовых значений за 3028 дней наблюдений. На рис. 1, а показано распределение по годам общего количества дней измерений, а также количества дней измерений летом (июнь–август) и в обсерватории «Фоновая».

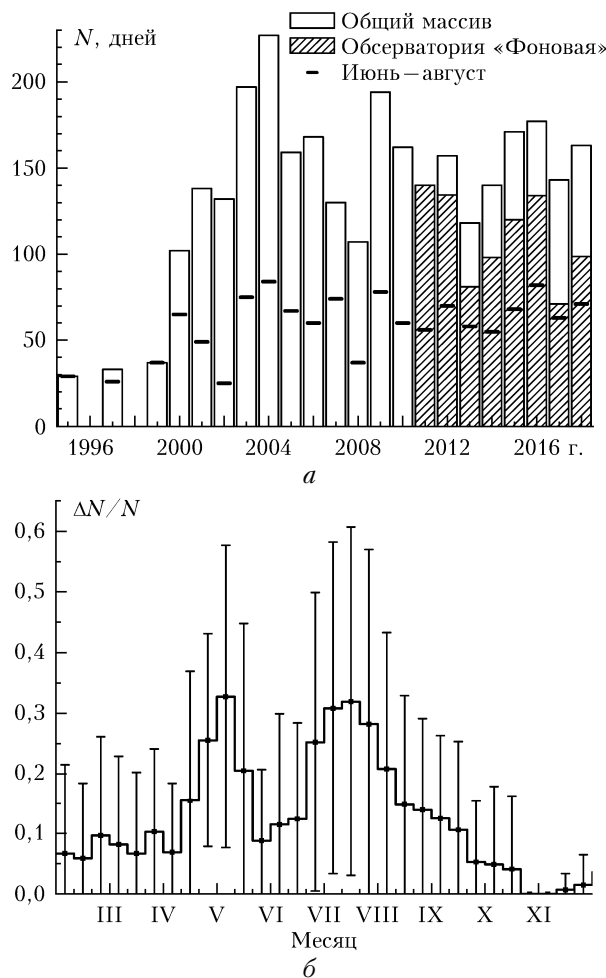


Рис. 1. Распределение по годам количества дней измерений АОТ (а) и декадное представление годового хода количества выявленных дымовых ситуаций (б)

Учитывая, что дымы лесных пожаров оказывают большое влияние на АОТ, помимо общего массива данных анализировалась выборка с исключенными ситуациями дымов (13709 часовых значений АОТ за 2661 день измерений). Выделение дымовых ситуаций выполнялось по методике [33], основанной на использовании пороговых значений параметров m , n : $m > 0,01$ и $n > -(1,080 + 1,006\ln m)$. На рис. 1, б показан средний годовой ход относительного числа ситуаций ($\Delta N/N$), которые с погрешностью 6–12% идентифицированы как дымы лесных пожаров.

К анализу многолетней изменчивости АОТ дополнительно привлечены результаты спутниковых измерений $\tau^a_{0,55}$ над югом Томской обл. (56–58° с.ш., 83–87° в.д.): данные проекта MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) версии 5.12.4 [34] и продукты MODIS (платформы Terra и Aqua) уровня 3, коллекция 6.1 [35], размещенные в свободном доступе на сайте Giovanni [36]. Сравнение этих данных с результатами наземных наблюдений (фотометры SP и CE-318) показало завышение спутниковых АОТ (при $\tau^a_{0,55} < 0,5$) на ~0,04 для данных MERRA-2 и 0,06

для MODIS. Однако нас интересовало не систематическое завышение или занижение АОТ, а наличие трендовой составляющей в многолетней изменчивости.

Кроме того, рассмотрена также изменчивость влагосодержания атмосферы W , которое измерялось в полосе поглощения водяного пара 0,94 мкм.

2. Сезонная изменчивость

На рис. 2, а представлен средний сезонный ход τ^c и $\tau_{0,5}^f$, рассчитанный по декадным значениям АОТ (с февраля по ноябрь), в трех вариантах: 1) для общего массива данных (с дымами); 2) без учета мощной дымной мглы, наблюдавшейся летом 2012 г. [37]; 3) для обычных условий (без дымов). Декабрь и январь не рассматривались из-за малого количества данных. Независимо от варианта, максимумы в среднем годовом ходе $\tau_{0,5}^f$ проявляются в 1-й декаде мая и в июле, а минимум — в ноябре. При учете дымовых ситуаций максимумы $\tau_{0,5}^f$ (особенно июльский) становятся более выраженными. Сезонная динамика грубодисперсной компоненты незначительна: до конца весны средние значения τ^c составляют 0,04–0,05, осенью они уменьшаются до 0,03. Дымы лесных пожаров практически не влияют на изменение τ^c .

Вследствие меньшей величины и слабой изменчивости τ^c сезонный ход общей АОТ (рис. 2, б) определяется поведением $\tau_{0,5}^f$. В сезонных вариациях $\tau_{0,5}^f$, как и в первый период наблюдений (1995–2008 гг.) [25], хорошо проявляются весенний и летний максимумы. Важное отличие в том, что прежде вторичный июльский максимум $\tau_{0,5}^f$ стал главным. Произошедшая трансформация годового хода хорошо видна при сравнении двух периодов измерений АОТ (рис. 2, б): 1995–2008 и 2009–2018 гг. (при исключении 2012 г. эта закономерность сохраняется). В первый период весенний максимум $\tau_{0,5}^f$ в 1,5 раза превышал июльский, а во второй стал в 2,5 раза меньше него. Рост летнего максимума объясняют участвовавшие лесные пожары в регионах Сибири. Изменение весеннего максимума рассмотрено в разд. 3.

Таким образом, как уже отмечалось в [25–28], важную роль в формировании годового хода АОТ в бореальной зоне играют дымовые замутнения атмосферы: летом — от лесных пожаров, весной — от палов прошлогодней растительности. При исключении дымов (нижняя кривая на рис. 2, б) весенний и летний максимумы сохраняются, но становятся слабовыраженными.

Сезонная динамика показателей селективности α и n имеет одинаковый вид (рис. 2, в), но есть отличия в причинах ее формирования. Более высокая селективность $\tau_{0,5}^f$ ($n > 2,2$) в теплый период по сравнению с зимним свидетельствует об уменьшении эффективного радиуса частиц и/или изменении показателя преломления. Поведение показателя α отражает влияние двух факторов: 1) увеличения селективности АОТ в теплый период вследствие вышеупомянутого роста показателя n у мелкодисперсной

составляющей; 2) сезонного перераспределения вклада в АОТ двух фракций аэрозоля (так как $\alpha \sim \ln(\tau_{0,5}^f/\tau^c)$) [26, 38].

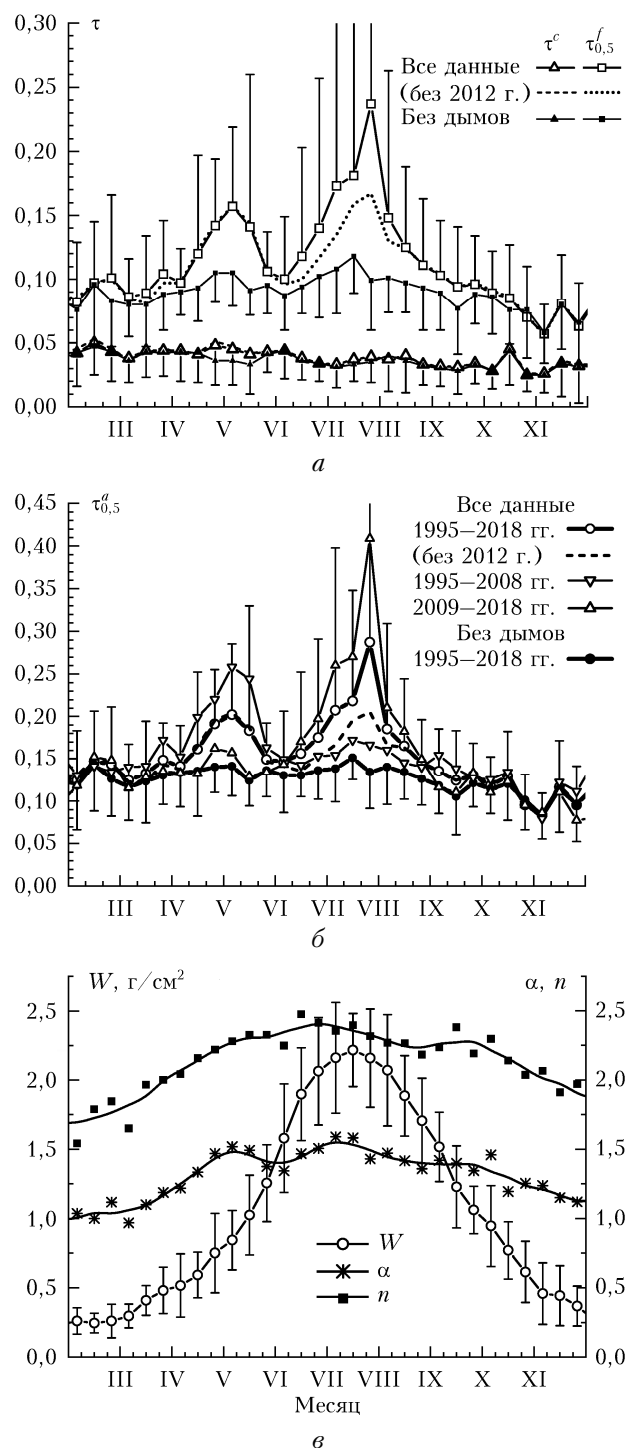


Рис. 2. Годовой ход τ^c и $\tau_{0,5}^f$ с учетом и без учета дымов (а); $\tau_{0,5}^f$ для разных периодов наблюдений (б); показателей селективности α , n и влагосодержания атмосферы W (в)

В табл. 1 представлены средние характеристики АОТ в указанные периоды максимумов и минимумов годового хода.

Средние значения характеристик АОТ во время экстремумов годового хода за 1995–2018 гг.
(в скобках указаны модальные значения $\tau_{0,5}^a$)

Характеристика АОТ	Все данные (с дымами)			Без дымов		
	21.04–10.05	1–20.07	Октябрь–ноябрь	21.04–10.05	1–20.07	Октябрь–ноябрь
$\tau_{0,5}^a$	0,197 (0,105)	0,212 (0,125)	0,107 (0,075)	0,140 (0,105)	0,145 (0,125)	0,105 (0,075)
$\tau_{0,5}^f$	0,150	0,177	0,075	0,105	0,113	0,074
$\tau^c (\approx \beta)$	0,046	0,035	0,032	0,036	0,032	0,031
α	1,50	1,59	1,25	1,43	1,55	1,25
n	2,25	2,49	2,13	2,22	2,54	2,13
m	0,032	0,039	0,019	0,023	0,022	0,018

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что относительная амплитуда годового хода (отношение максимум/минимум) в обычных условиях (без дымов) у $\tau_{0,5}^a$ и $\tau_{0,5}^f$ составляет 1,4 и 1,5, а с учетом дымов увеличивается до 2 и 2,4 соответственно. Дымовой аэрозоль увеличивает весенний и летний максимумы $\tau_{0,5}^a$ и $\tau_{0,5}^f$ в $\sim 1,4$ раза. Параметр α во время весеннего/летнего максимума в $\sim 1,2$ раза больше осенних значений, а $\tau^c (\approx \beta)$ и m в разные периоды года различаются незначительно. Параметр селективности n , как при учете, так и без учета дымов, в среднем составляет $\sim 2,2$ весной, $\sim 2,5$ в июле и 2,13 осенью. То есть дымы практически не влияют на наклон спектральной зависимости τ_{λ}^f .

В отличие от АОТ годового ход общего влагосодержания атмосферы хорошо выражен (см. рис. 2, в) и представляет собой периодическое колебание. Минимальное влагосодержание наблюдается в декабре – феврале ($0,27 \pm 0,13$ г/см²), а максимальное – в июле ($2,01 \pm 0,60$ г/см²).

3. Межгодовая изменчивость

Межгодовая изменчивость $\tau_{0,5}^f$ и τ^c оценивалась для годовых (средних для каждого года) значений, а также для измеренных в летний (июнь – август) период, отличающийся большим количеством и однородностью измерений (см. рис. 1, а). Заметим, что разница между летними и годовыми значениями $\tau_{0,5}^f$ и τ^c составляет в среднем 0,01 (на 11% больше) и $-0,002$ (на 4% меньше) соответственно.

Анализ многолетней изменчивости τ^c (рис. 3, а) показал наличие значимого (по уровню 0,05) отрицательного тренда для всех вариантов выборки данных («с дымами» и «без дымов») для годовых и летних значений. Уменьшение грубодисперсной компоненты АОТ за 24 года наблюдений в среднем составило 0,03 (тренд $\sim 0,013$ за 10 лет).

В многолетней изменчивости мелкодисперсной компоненты АОТ наблюдаются тенденции роста и очень высокие (в сравнении с τ^c) вариации, обусловленные дымами лесных пожаров. В 2012 и 2016 гг. всплески $\tau_{0,5}^f$ проявились не только в среднелетних, но и в годовых значениях. Важно, что до 2001 г. средние $\tau_{0,5}^f$ оказались в 1,5 раза меньше, чем в последующий период. На такой результат могло повлиять недостаточное количество измерений в начальный

период (см. рис. 1, а). Поэтому для более достоверных оценок далее рассматривалось изменение АОТ в период 2002–2018 гг.

Анализ $\tau_{0,5}^f$ в этот период показал разные тенденции межгодовой изменчивости, зависящие от выбора данных: «с дымами» или «без дымов», годовые или летние значения. В частности, годовые значения $\tau_{0,5}^f$ в выборке «без дымов» уменьшаются, а «с дымами» растут.

Что касается общей АОТ, то значимый отрицательный тренд (0,02 за 10 лет) выявлен только для годовых значений $\tau_{0,5}^f$ при исключении 2012 г. (рис. 3, б). Очевидно, что уменьшение АОТ было обусловлено трендом τ^c . В многолетней изменчивости летних значений АОТ (рис. 3, в) трендовая составляющая не проявилась. По данным спутниковых наблюдений над югом Томской обл. тренд АОТ тоже отсутствует: межгодовые колебания $\tau_{0,55}^a$ аналогичны наземным данным, но средние значения больше (у MERRA-2 на 0,02, у MODIS на 0,08).

При обсуждении сезонного хода $\tau_{0,5}^a$ (см. рис. 2, б) отмечалось снижение весеннего максимума в последнее 10-летие. Поэтому отдельно рассмотрена многолетняя изменчивость весенних (21.04–10.05) значений $\tau_{0,5}^a$ для общего массива данных без учета 2012 г. На рис. 3, б (верхняя кривая) хорошо видно постепенное уменьшение АОТ в весенний период на $\sim 0,15$ (тренд 0,095 за 10 лет). Спад весеннего максимума АОТ, по-видимому, объясняется уменьшением числа палов растительности из-за введенных запретов.

Таким образом, многолетняя изменчивость АОТ в 2002–2018 гг. сформировалась под влиянием трех факторов: 1) отрицательного тренда τ^c ; 2) тенденции роста летних значений $\tau_{0,5}^f$ из-за участвовавших лесных пожаров; 3) значимого спада АОТ в весенний период.

На рис. 4 видно, что у показателя n наблюдается значимый тренд (см. кривые вверху): годовые значения n за 17 лет снизились от $\sim 2,3$ до 1,9, а летние – от $\sim 2,5$ до 2,1. Этот факт говорит об уменьшении наклона (в логарифмической шкале) спектральных зависимостей $\tau_{\lambda}^f(\lambda)$. Заметим, что исключение дымов не влияет на тенденцию многолетнего спада показателя n .

Годовые значения показателя α варьируются в относительно узком диапазоне $1,32 \pm 0,14$ (летние $1,50 \pm 0,12$), трендовая составляющая отсутствует.

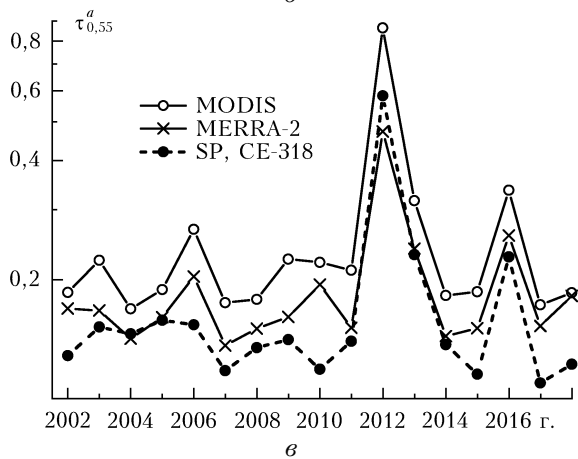
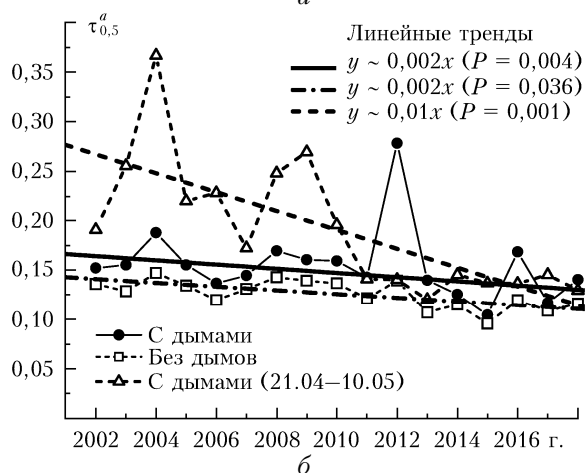
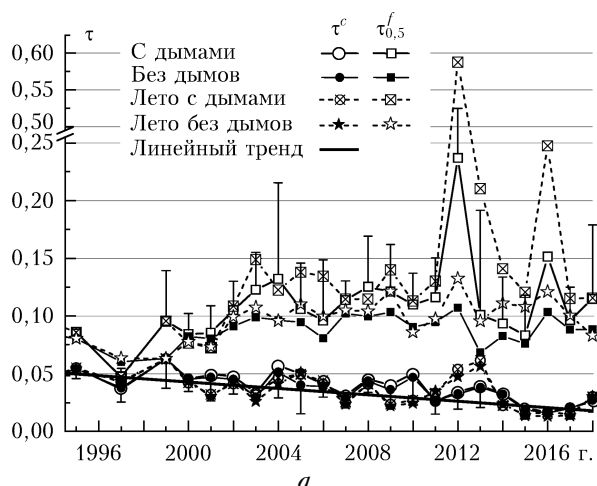


Рис. 3. Межгодовая изменчивость: годовых и летних значений τ^c , $\tau_{0,5}^f$ (а); годовых и весенних (21.04–10.05) значений $\tau_{0,5}^a$ (б); летних значений $\tau_{0,55}^a$ по данным наземных (SP и CE-318) и спутниковых (MODIS, MERRA-2) наблюдений (в). Полуштриховыми линиями обозначены линейные тренды (по уровню $P \leq 0,05$)

По спутниковым данным (MERRA-2), летние значения α в среднем немного ниже ($1,31 \pm 0,12$), но и здесь тренд не наблюдается.

Завершая анализ изменчивости АОТ, приведем средние многолетние значения основных характеристик, рассчитанных по годовым (средним для каждого

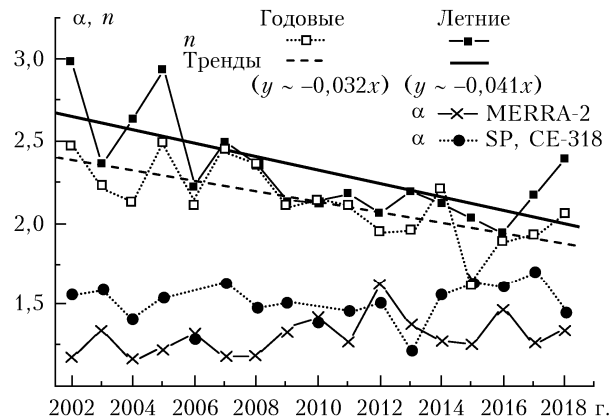


Рис. 4 Межгодовая изменчивость показателей селективности α , n по данным наземных (SP и CE-313) и спутниковых (MERRA-2) измерений. Полуштриховыми линиями показаны линейные тренды (по уровню $P \leq 0,003$)

года) значениям. Из табл. 2 видно, что среднее значение $\tau_{0,5}^a$ в период 2002–2018 гг. составило 0,155 и основной вклад (73–76%) в нее вносит мелкодисперсная составляющая АОТ. Средняя величина $\tau_{0,5}^a$ при учете дымов увеличивается на 28%. Все другие характеристики имеют близкие значения в выборках «с дымами» и «без дымов» и мало меняются год от года. В частности, коэффициент вариаций показателей селективности α и n не превышает 11%.

Таблица 2

Средние многолетние значения характеристик АОТ в Томске (2002–2018 гг.)

Характеристика АОТ	Все данные	Без дымов
$\tau_{0,5}^a$	$0,155 \pm 0,038$	$0,126 \pm 0,014$
$\tau_{0,5}^f$	$0,118 \pm 0,034$	$0,092 \pm 0,010$
$\tau^c (\approx \beta)$	$0,037 \pm 0,012$	$0,034 \pm 0,010$
α	$1,33 \pm 0,14$	$1,30 \pm 0,14$
n	$2,09 \pm 0,20$	$2,10 \pm 0,19$
m	$0,030 \pm 0,012$	$0,022 \pm 0,003$

Межгодовая изменчивость влагосодержания атмосферы в районе Томска рассмотрена для летнего периода (июнь – август). Анализ многолетнего ряда не выявил каких-либо особенностей: средние значения W варьируются в диапазоне от 1,7 до 2,3 г/см², статистически значимый тренд отсутствует. Заметим, что оценки многолетней изменчивости влагосодержания разных авторов (см. [6] и ссылки в ней) не дают однозначного ответа о наличии трендовой составляющей в современный период. Чаще отмечается небольшой положительный тренд, но его выделение затруднено более сильным влиянием сезонных, синоптических и длительных (10–13 лет) колебаний.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Средний годовой ход АОТ в районе Томска характеризуется минимумом в ноябре ($\tau_{0,5}^a = 0,107$) и максимумами в начале мая и в июле, степень их выраженности зависит от учета дымов лесных пожаров ($\tau_{0,5}^a = 0,15-0,21$). Сезонная динамика АОТ определяется мелкодисперсной составляющей. В период наблюдений 2009–2018 гг., по сравнению с предшествующим (1995–2008 гг.), произошла трансформация сезонного хода АОТ и преобладающим стал июльский максимум. Селективность спектральных зависимостей $\tau^a(\lambda)$ и $\tau^f(\lambda)$ выше летом. В холодный период средние показатели селективности варьируются в диапазонах $\alpha = 1-1,3$ и $n = 1,5-2,2$, а в теплый период – в диапазонах $\alpha = 1,3-1,6$ и $n = 1,5-2,2$.

2. Межгодовая изменчивость АОТ обусловлена действием трех составляющих: значимых отрицательных трендов τ^c и $\tau_{0,5}^f$ (весной), а также тенденцией роста летних значений $\tau_{0,5}^f$ из-за дымов лесных пожаров. Отрицательный тренд годовых значений общей АОТ составляет $-0,02$ за десятилетие. Среднее многолетнее значение АОТ в период 2002–2018 гг.: $\tau_{0,5}^a = 0,155$ (в том числе $\tau_{0,5}^f = 0,118$), без дымов – $\tau_{0,5}^a = 0,126$ (в том числе $\tau_{0,5}^f = 0,092$).

3. В многолетней изменчивости показателя селективности Ангстрема трендовая составляющая отсутствует: годовые значения α в среднем составляют $1,32 \pm 0,14$, а летние – $1,50 \pm 0,12$. Отмечен значимый отрицательный тренд показателя селективности n , что свидетельствует об уменьшении селективности спектральной зависимости $\tau^f(\lambda)$. Закономерности многолетней изменчивости характеристик АОТ ($\tau_{0,5}^a$ и α) качественно согласуются с данными спутниковых измерений над югом Томской обл.

Выражаем признательность коллегам из GSFC/NASA, обеспечивающим работу сети AERONET, а также исполнителям проектов MERRA-2, MODIS и ассоциированному персоналу NASA за предоставление данных, которые использовались в нашей работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (проект № АААА-А17-117021310142-5).

1. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change [Electronic resource]. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (last access: 19.02.2019).
2. Тимофеев Ю.М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2010. 129 с.
3. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 800–809; Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total ozone variations and trends during the period 1979–2014 // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 575–584.
4. Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Дорохов В.М., Терёб Н.В. Спектральные наблюдения изменений общего содержания озона в Обнинске и Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 325–331.

5. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриченко А.В. Современные изменения климата пограничного слоя атмосферы над территорией Сибирского региона / под общ. ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 212 с.
6. Хуторова О.Г., Хуторов В.Е., Теттин Г.М. Межгодовая изменчивость приземного и интегрального влагосодержаний на территории Европы и атмосферная циркуляция // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 432–437; Khutorova O.G., Khutorov V.E., Tetin G.M. Interannual variability of surface and integrated water vapor and atmospheric circulation in Europe // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 31, N 5. P. 486–491.
7. Тимофеев Ю.М. Исследование атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 367 с.
8. Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Джола А.В., Штабкин Ю.А., Ван Пусай, Ван Ген Чен, Васильева А.В., Макарова М.В., Гречко Е.И. Исследование трендов общего содержания СО и СН₄ над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 449–456; Rakitin V.S., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Dzhola A.V., Shtabkin Yu.A., Wang P., Wang G., Vasilieva A.V., Makarova M.V., Grechko E.I. Study of trends of total CO and CH₄ contents over Eurasia through analysis of ground-based and satellite spectroscopic measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 517–526.
9. Еланский Н.Ф., Локащенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51.
10. Справочник эколого-климатических характеристик г. Москвы / под ред. А.А. Исаева. М.: Изд-во МГУ, 2005. Т. 2. 410 с.
11. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет Торстанции ИОА СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ilev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnava T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
12. Yausheva E.P., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Long-term variability of aerosol and Black Carbon concentrations in the atmospheric surface layer as results of 20-years measurements at the IAO Aerosol Station // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. DOI: 10.1117/12.2287375.
13. Груздев А.Н., Исаков А.А. О природе долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 810–815; Gruzdev A.N., Isakov A.A. On the nature of long-period variations in mass concentration of near-ground aerosol // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 73–78.

14. *Емиленко А.С., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Ван Ген Чен.* Долговременная изменчивость загрязнения атмосферы черным углеродом в регионе Пекина в осенние периоды // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 497–501; *Emilenko A.S., Sviridenkov M.A., Kopeikin V.M., Wang Gengchen.* Long-term variability of air pollution with black carbon in the region of Beijing in autumn periods // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 550–554.
15. *Reche C., Querol X., Alastuey A., Viana M., Pey J., Moreno T., Rodriguez S., González Y., Fernández-Catacho R., Sánchez de La Campa A.M., de La Rosa J., Dall'Osto M., Prévôt A.S.H., Hueglin C., Harrison R.M., Quincey P.* Variability of levels of PM, black carbon and particle number concentration in European cities // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2011. N 11. P. 8665–8717. DOI: 10.5194/ACPD-11-8665-2011.
16. WMO/GAW Expert Workshop on a global surface-based network for long term observations of column aerosol optical properties // U. Baltensperger, L. Barrie, C. Wehrli (eds.). Davos, Switzerland: WMO, 2005. N 162. 144 p. URL: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1287.pdf (last access: 19.02.2019).
17. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
18. *Гущин Г.П.* Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 200 с.
19. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В.* Прозрачность атмосферы за последние 50 лет и ее изменение на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 188 с.
20. *Махоткина Е.Л., Лукин А.Б., Плахина И.Н., Панкратова Н.В.* Анализ годового хода и межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над территорией России // *Исслед. Земли из космоса.* 2006. № 5. С. 63–71.
21. *Плахина И.Н., Панкратова Н.В., Махоткина Е.Л.* Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным Российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2009. Т. 45, № 4. С. 489–500.
22. *Горбаренко Е.В., Рублев А.Н.* Многолетние изменения оптической толщины аэрозоля в Москве с учетом коррекции в сильно замутненной атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2016. Т. 52, № 2. С. 213–221.
23. *Chubarova N.Y., Poliukhov A.A., Gorlova I.D.* Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 2. P. 313–334.
24. *Li J., Carlson B.E., Dubovik O., Lacis A.A.* Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 4, N 22. P. 12271–12289.
25. *Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под общей ред. С.М. Сакерина.* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
26. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Ташчилин М.А., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A.* Анализ подходов моделирования годового и спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы в регионах Сибири и Приморья // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. P. 1047–1058; *Sakerin S.M., Beresnev S.A., Kabanov D.M., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Poddubny V.A., Tashchilin M.A., Turchinovich Yu.S., Holben B.N., Smirnov A.* Analysis of approaches to modeling the annual and spectral behaviors of atmospheric aerosol optical depth in Siberia and Primorye // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 145–157.
27. *Kabanov D.M., Beresnev S.A., Gorda S.Yu., Holben B.N., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Sakerin S.M., Smirnov A., Tashchilin M.A.* Annual behavior of the aerosol optical depth in some regions of Asian part of Russia // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 929241-1–6. DOI: 10.1117/12.2074887.
28. *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Finely and coarsely dispersed components of atmospheric aerosol optical depth in the region of Tomsk: Interannual and seasonal variations // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205029.
29. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* О сезонной и межгодовой изменчивости характеристик аэрозольной оптической толщи атмосферы // *Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XXV Междунар. симпоз., 1–5 июля 2019 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2019 (в печати).*
30. *Кабанов Д.М., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Корниенко Г.И., Назулаев С.А., Павлов А.Н., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакерин С.М., Шмирко К.А.* О результатах двухточечных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в нескольких регионах России // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 11. С. 960–971. DOI: 10.15372/AOO20161110.
31. *O'Neill N.T., Eck T.F., Smirnov A., Holben B.N., Thulasiraman S.* Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D17. P. 4559–4573. DOI: 10.1029/2002JD002975.
32. *Kabanov D.M., Sakerin S.M.* Comparison of assessment techniques of fine and coarse component aerosol optical depth of the atmosphere from measurement in the visible spectrum // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. DOI: 10.1117/12.2248657.
33. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Анализ дымовых ситуаций в районе Томска и модификация метода их выделения по данным спектрофотометрических наблюдений // *Тез. докл. XII Сибирского совещания и школы молодых ученых по климату-экологическому мониторингу. 17–20 октября 2017. Томск. С. 49–50.*
34. *Global Modeling and Assimilation Office (2015), M2IMNXGAS // GES DISC [Electronic resource]. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2IMNXGAS_5.1.2.4/summary (last access: 17.02.2019).*
35. *Levy R.C., Mattoo S., Munchak L.A., Remer L.A., Sayer A.M., Patadia F., Hsu N.C.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6, N 11. P. 2989–3034. DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013.
36. *Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // *Eos. Trans. AGU.* 2007. V. 88, N 2. P. 14–17.
37. *Zhuravleva T., Kabanov D., Nasrtdinov I., Russkova T., Sakerin S., Smirnov A., Holben B.* Radiative characteristics of aerosol under smoke mist conditions in Siberia during summer 2012 // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 179–198. DOI: 10.5194/amt-10-179-2017.
38. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи

атмосферы в морских и полярных районах // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 690–697; *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Fine and coarse components

of atmospheric aerosol optical depth in maritime and polar regions // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.

D.M. Kabanov, S.M. Sakerin, Yu.S. Turchinovich. **Interannual and seasonal variations in the atmospheric aerosol optical depth near Tomsk (1995–2018).**

Seasonal and interannual variations in the atmospheric aerosol optical depth (AOD) are analyzed using multiyear (1995–2018) observations near Tomsk. The annual behavior of AOD is characterized by a minimum in November and maxima in early May and in July. Compared to the previous period (1995–2008), the annual behavior has been transformed so that the July maximum started to dominate. In the interannual variations we noted a significant negative trend of coarse-mode component and total AOD. The annually average AOD (0.5 μm) is 0.155 (0.126 without accounting for smokes) and the Ångström exponent is 1.32 for 2002–2018.